Loudness-filters

Met een loudness-filter kunt u de slechte eigenschappen van uw gehoor compenseren, zodat u ook bij lage volumes een goed gebalanceerd geluidsbeeld hoort. Een dergelijk filter was op vrijwel alle oude analoge versterkers aanwezig, maar ontbreekt helaas op de meeste moderne dgitale apparaten.

Auteur: Jos Verstraten, Landgraaf, Nederland
Email: josverstraten@live.nl
Publicatiedatum: 31-01-2023

De eigenschappen van het menselijk gehoor

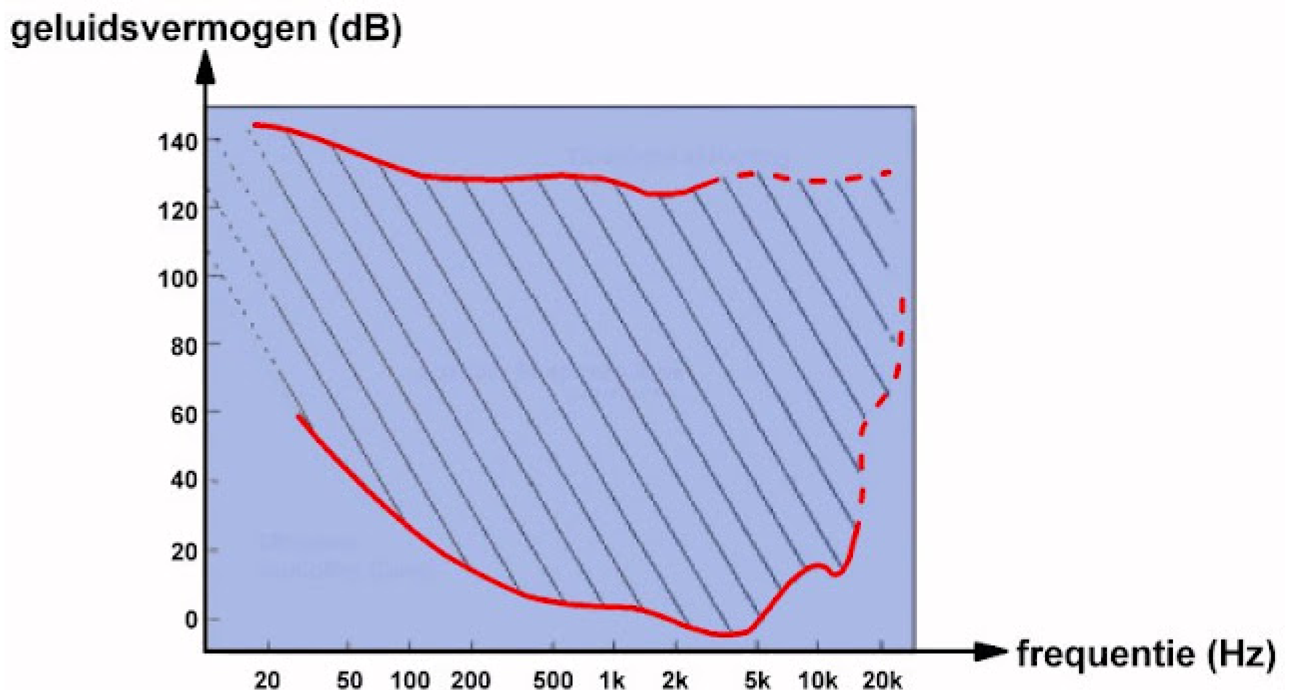
Ons frequentie-afhankelijk gehoor
U hebt het ook wel eens ervaren: vrije avond, niets op televisie, dus een lekker muziekje op, een boek en een pilsje. Flink volume, toonregeling soepel ingesteld, dynamisch geluid. Dan komt er visite, dus volume zachter en opeens is de sfeer weg, het klinkt nergens naar.
Geen gevolg van de visite, maar van een eigenschap van uw oren. Het menselijk gehoor is namelijk niet voor iedere frequentie even gevoelig. Met name voor lage en hoge frequenties is het menselijke gehoor heel wat ongevoeliger dan voor signalen met een frequentie rond 1 kHz. Als u dus de toonregeling voor een bepaald vermogen zo instelt dat het geluidsbeeld lekker klinkt, dan zal bij vermindering van het volume opeens blijken dat er veel te weinig lage en hoge tonen aanwezig zijn.

Frequentie-onafhankelijke volumeregeling
Dat is het rechtstreekse gevolg van de frequentie-onafhankelijke werking van een normale volumeregeling. Draait u aan die knop, dan zullen alle frequenties even veel versterkt of even veel verzwakt worden, afhankelijk van de draairichting van de knop. In feite zou de volumeregeling zo moeten werken, dat bij daling van het volume de lage en hoge tonen minder verzwakt worden dan de middentonen. Bovendien zou voor iedere verzwakking deze volumeregeling een volledig aan de gehoorcurve aangepaste karakteristiek moeten hebben.

De gehoorcurve
Het oor is een orgaan dat drukverschillen in de lucht detecteert, deze omzet in elektrische signalen en deze doorstuurt naar de hersenen. In de hersenen worden deze signalen geïnterpreteerd en vertaald naar herkenbare geluiden. Bij het luisteren naar muziek wordt dat oor getroffen door een veelheid aan drukverschillen met een zeer verschillende trillingsduur. Het bereik gaat diepe bassen, met enige tientallen trillingen per seconde, tot frele of schrille hoge tonen met 15.000 trillingen per seconde. Uiteraard heeft men gezocht naar mogelijkheden om het verband tussen de frequentie van een trilling en reactie van het oor op die trilling op te sporen. Dat verband kan grafisch worden samengevat in één grafiek die men de '*gehoorcurve*' noemt.

Fletcher, Munson, Robinson en Dadson
Met name Fletcher, Munson, Robinson en Dadson hebben heel wat onderzoekingen verricht, die tegenwoordig dan ook als standaard op dit gebied worden aanvaard. Op de eerste plaats hebben deze onderzoekers onderzocht wat het minimale geluidsvolume is waarvoor het oor gevoelig is en of dit volume afhankelijk is van de frequentie van de trilling. Men zette een groot aantal proefpersonen een hoofdtelefoon op het hoofd, voerde een signaal met een

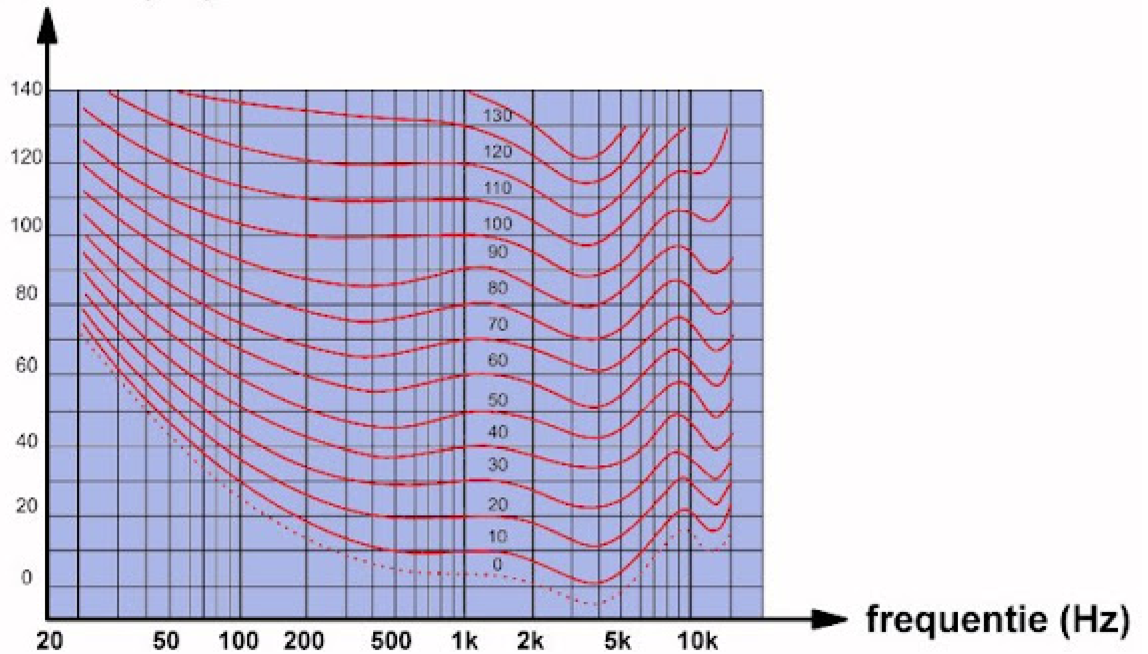
bepaalde frequentie toe en vermeerderde het volume van dat signaal. De proefpersonen moesten een seintje geven als zij het signaal waarnamen. Op meetapparatuur kon men dan het geluidsvermogen aflezen. Na het toepassen van wat statistische berekeningen op de meetresultaten van de diverse proefpersonen kwam de onderste rode lijn in de grafiek van de onderstaande figuur tot stand. Duidelijk blijkt dat het gehoor zeer gevoelig is voor signalen met frequenties rond 1 kHz, maar zeer ongevoelig is voor laagfrequente signalen.
Men moet dus een veel sterker signaal met een frequentie van 20 Hz toevoeren, wil een mens dit geluid waarnemen, dan het geval is bij een signaal met een frequentie van 1 kHz.
Wij willen er even op wijzen dat het bedoelde gevoeligheidsverschil heel groot is. De verticale as is geijkt in dB en de verschillen lopen dan snel op. Zo is het vermogensverschil tussen een hoorbaar signaal bij 1 kHz of bij 20 Hz meer dan een factor 1.000.000!



De gehoorcurve van het menselijk oor. (© 2023 Extron, edit door Jos Verstraten)

Op de tweede plaats hebben de genoemde onderzoekers ook de zogenaamde '*pijngrens*' opgemeten. Dat is een curve die het volume van een geluid aangeeft dat geen gehoorindruk, maar een pijnindruk opwekt. Ook deze curve, de bovenste rode lijn in de grafiek, is frequentie-afhankelijk, maar de lijn blijkt wel veel vlakker te liggen dan de curve van de gehoorgrens.
Uit deze grafiek kunt u dus de conclusie trekken dat de gevoeligheid van het oor niet alleen afhankelijk is van de frequentie, maar ook van het vermogen van het signaal.

De isofonenbundel van Robinson en Dadson
Bij een volgend onderzoek werd een aantal zogenaamde '*isofonen*' opgesteld. Dat zijn curven die het vermogen aanduiden dat signalen van een bepaalde frequentie moeten hebben om dezelfde luidheidsindruk in het oor op te wekken als een referentiesignaal van een bepaald vermogen en een frequentie van 1 kHz. Deze bundel lijnen gaat door het leven als de '*isofonenbundel van Robinson en Dadson*' en is in de onderstaande grafiek voorgesteld.
Men doet dat in de praktijk als volgt. De proefpersonen krijgen weer een hoofdtelefoon op het hoofd gedrukt, in één schelp wordt een signaal met een frequentie van 1 kHz en met een bepaald vermogen ten gehore gebracht. De andere schelp krijgt een signaal met de testfrequentie. Het vermogen van dat signaal moet de proefpersoon zó instellen, dat het even luid klinkt als de 1 kHz referentie in de andere schelp.
Deze metingen worden herhaald voor ander referentieniveaus bij 1 kHz.
Uit deze grafieken volgt zeer duidelijk dat hoe, hoger het volume van een signaal wordt, hoe gelijkmatiger de gevoeligheid van het oor is. Slechts bij zeer lage volumes zal het oor de lage en hoge tonen onevenredig ongevoelig detecteren.



De isofonenbundel van Robinson en Dadson. (© WikiMedia, edit door Jos Verstraten)

Opmerking
In diverse bronnen wordt deze set curves de '*Fletcher-Munson curves*' genoemd. Deze twee wetenschappers van de Bell laboratoria hebben reeds in 1933 identieke experimenten uitgevoerd en een vrijwel identieke isofonenbundel opgesteld. De Robinson-Dadson curves werden eerst in 1956 opgesteld en werden de basis van de ISO-226:2003 standaard.

De gevolgen van de isofonen
Wat zijn nu de praktische gevolgen van deze gekke eigenschappen van het oor op de interpretatie van muziek? Op de eerste plaats zal duidelijk zijn dat een toonregeling niet zomaar een overbodige verfraaiing van een versterker is, maar pure noodzaak. Zelfs een geluidsreproduktiesysteem dat ideaal is en door de luidspreker precies dat laat horen wat opgenomen is, moet toch flink gecorrigeerd worden om het verloop van de gevoeligheid van het menselijke oor te compenseren. U zult immers thuis zelden of nooit muziek op hetzelfde volume afspelen als in de concertzaal of de disco werd gedaan. Dat zal er in de praktijk op neerkomen dat u de lage en hoge tonen een extra versterking moeten geven, reden dan ook dat de toonregeling op bijna alle versterkers vastgeroest zit in de '*ophaal*'-stand.
Maar er is meer! U stelt de toonbalans voor een bepaald uitgangsvermogen van uw versterker volgens uw gehoor goed in. Nu vermindert u om een of andere reden dat uitgangsvermogen. Het geluid gaan dan dunnetjes klinken. Hoe dat komt, kunt u uit de isofoon-curves verklaren. Bij het hoge vermogen had u de weergavekarakteristiek van uw versterker zo ingesteld, dat die overeenkwam met de isofoon voor dat bepaald vermogen. Gaat de luidheid dalen, dan zal ons oor reageren volgens een andere isofoon, waarbij de gevoeligheid voor lage en hoge tonen lager is. De weergavekarakteristiek van uw versterker voldoet nu niet meer aan die nieuwe isofoon, met als gevolg dat er te weinig lage en hoge tonen in het signaal aanwezig lijken.
U moet in theorie dus voor iedere stand van de volumepotmeter een eigen stand van de toonregelaars verzinnen. Omdat dit in de praktijk lastig is, heeft men er wat anders op verzonnen.

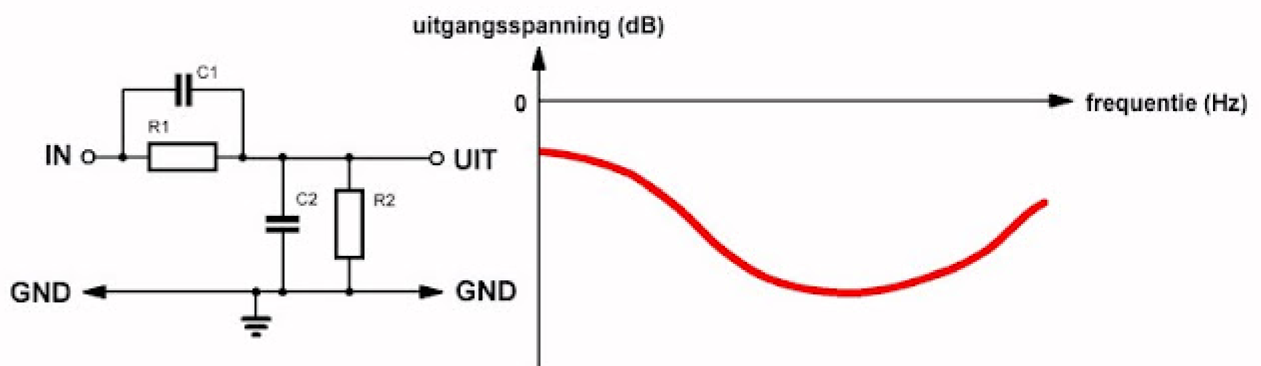
Fysiologische volumeregeling

Definitie

Een '*fysiologische volumeregeling*' is een volumeregeling die rekening houdt met de specifieke eigenaardigheden van het menselijk lichaam. In de praktijk wordt een dergelijke volumeregeling echter meestal '*loudness-filter*' genoemd.

Niet meer versterken, maar minder verzwakken!
Uit het isofonenverhaal zal duidelijk zijn dat, als u de weergavekarakteristiek van uw weergavesysteem wilt aanpassen aan de gevoeligheid van uw oren, u een versterking van de lage en hoge tonen moeten toepassen bij vermindering van het vermogen. Nu zijn versterkingen in de elektronica nooit eenvoudig te verwezenlijken, omdat daarvoor steeds transistoren of op-amp's nodig zijn. Men redeneert daarom anders: als u het vermogen van uw versterker wilt verlagen en toch een juiste toonbalans wilt houden, dan moet u de lage en hoge tonen minder verzwakken dan de middenfrequenties.
Op deze manier kunt u de isofonen in een geluidssysteem inbouwen, zonder gebruik te moeten maken van extra actieve versterkertrappen.

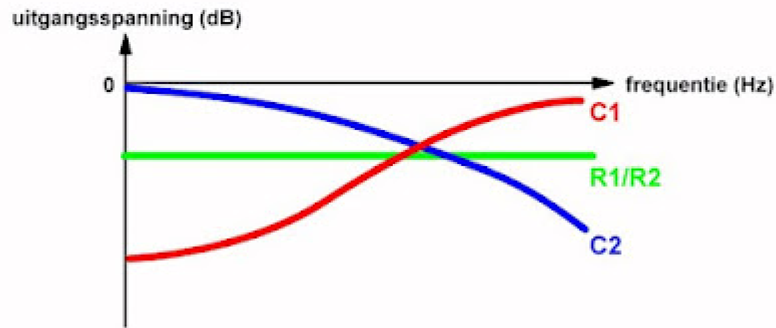
Het basisprincipe van de fysiologische volumeregeling
Het basisprincipe waarmee vrijwel alle bedachte loudness-filters werken is getekend in de onderstaande figuur. U ziet dat het schema uit niets anders bestaat dan twee weerstanden en evenveel condensatoren. Naast het schema is de weergavekarakteristiek weergegeven van dit netwerkje in functie van de frequentie.
Deze karakteristiek voldoet aan de eisen: de lage en hoge tonen worden minder verzwakt dan de middenfrequenties.
Voor de duidelijkheid: Omdat wij hier te maken hebben met een verzwakking is het verloop van de uitgangsspanning voorgesteld door een lijn onder de 0 dB as.
Op dit basisschema zijn ontelbare variaties ontworpen, die echter allemaal op een identieke manier de frequentie-karakteristiek van een audiosysteem beïnvloeden.



Het basisprincipe van ieder loudness-filter. (© 2023 Jos Verstraten)

Verklaring van de weergavekarakteristiek
Natuurlijk wilt u weten waarom een en ander is zoals het is getekend. Vandaar dat we de weergavegrafiek nog eens getekend hebben, maar nu uitgesplitst. Het netwerkje bestaat uit verschillende onderdelen die allemaal een bepaalde invloed op het amplitudeverloop in functie van de frequentie hebben.
Voor de bespreking is het noodzakelijk eraan te herinneren dat de wisselstroomweerstand van een condensator frequentie-afhankelijk is. Hoe hoger de frequentie, hoe lager de wisselstroomweerstand van zo'n onderdeel. Bovendien gaat de weerstand van een condensator dalen als de waarde groter wordt.
De invloed van de spanningsdeler, gevormd door de twee weerstanden, zal duidelijk zijn. De waarde van een weerstand is frequentie-onafhankelijk. De verzwakking van het ingangssignaal veroorzaakt door de twee weerstanden zal dus voor alle frequenties even groot zijn. Vandaar dan ook de horizontale groene lijn in de onderstaande grafiek.
Bekijk nu de invloed van de condensator C2. Deze staat parallel aan R2 en zal dus met R1 een frequentie-afhankelijke spanningsdeler vormen. Voor lage frequenties is de grote weerstand van de condensator te verwaarlozen en zal het ingangssignaal onverzwakt (we laten de invloed van R2 even buiten beschouwing) aan de uitgang verschijnen. Als de frequentie stijgt zal de weerstand van C2 dalen, met als gevolg dat er steeds meer spanning

over de weerstand R1 staat en steeds minder over C2. Deze condensator heeft tot gevolg dat de hoge frequenties worden verzwakt, vandaar de dalende blauwe curve in de grafiek.



Verklaring van de weergavekarakteristiek.
(© 2023 Jos Verstraten)

Tot slot de invloed van de condensator Cl. Dit onderdeel staat in serie met de signaalloop. Dat wil zeggen dat deze weinig signaal zal doorlaten als zijn weerstand groot is. Dat is het geval bij lage frequenties, zodat C1 ervoor zal zorgen dat de lage frequenties meer verzwakt worden dan de hoge. Vandaar dan ook de stijgende rode lijn in de grafiek.
De totale verzwakking van het netwerk is gelijk aan de som van de drie deelverzwakkingen. Als u er voor zorgt, door de juiste keuze van de twee condensatorwaarden, dat de verzwakking van de hoge frequenties door C2 kleiner is dan de verzwakking van dezelfde frequenties door C1, dan zal de som van de drie deelverzwakkingen het gewenste resultaat opleveren.

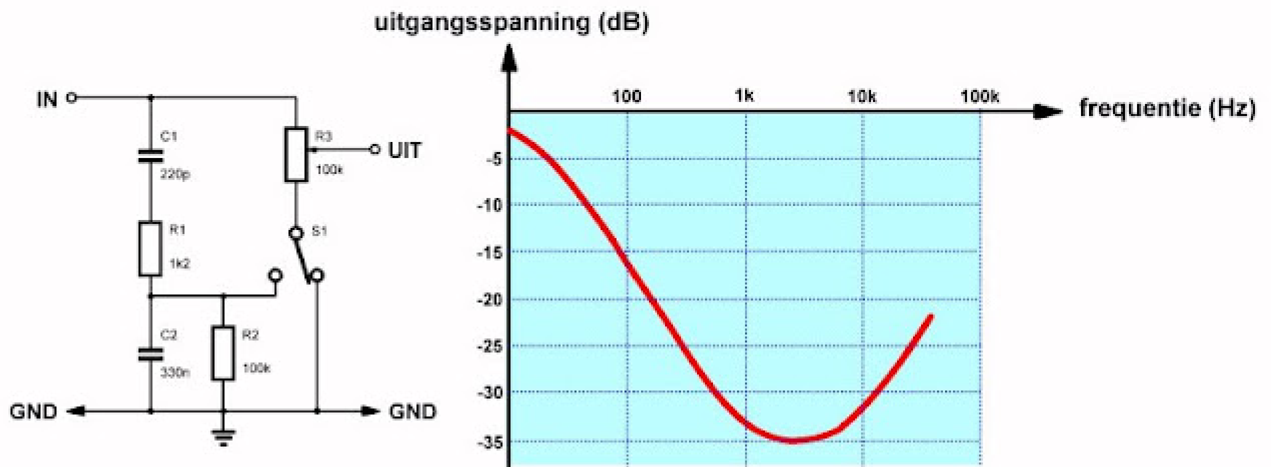
Loudness-filters met een schakelaar

Inleiding

De meest eenvoudige manier voor het introduceren van een loudness-filter in uw audio-installatie is gebruik te maken van een RC-netwerkje dat u met een schakelaar in of uit de signaalloop schakelt. In de meeste gevallen past men één RC-netwerkje toe, zodat het loudness-filter in feite maar voor een specifiek luidheidsniveau van de isofonenbundel van Robinson en Dadson compenseert. Dat is dus duidelijk een compromis! Iets uitgebreidere netwerken maken gebruik van twee- of meerstanden schakelaars waarmee u voor diverse luidheidniveaus kunt compenseren.

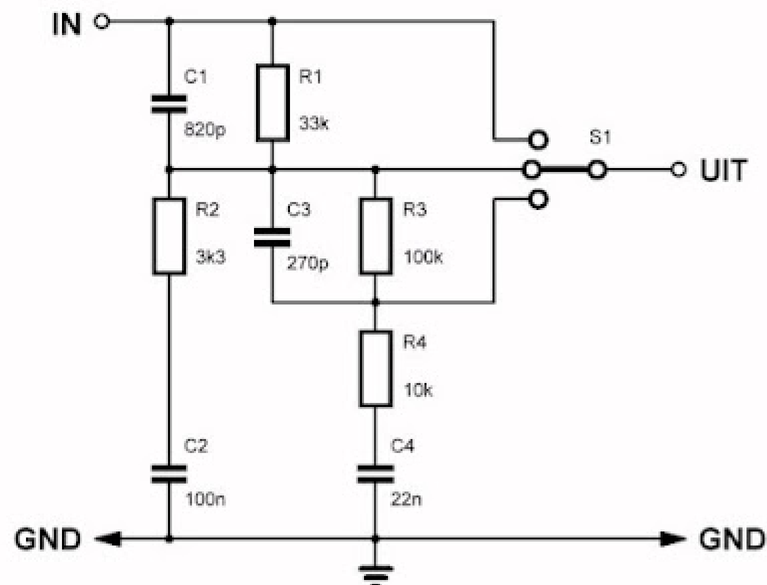
Een eenvoudig AAN/UIT loudness-filter

Een heel eenvoudig loudness-filter is voorgesteld in de onderstaande figuur. Dit ontwerpje komt uit een application note van Signetics en wordt opgenomen in de schakeling van de volumepotentiometer. In de getekende stand van de omschakelaar S1 is het filter uitgeschakeld en regelt de volumepotentiometer R4 lineair. In de andere stand van de schakelaar wordt het filter actief. Als de loper van de potentiometer boven staat (maximaal volume) werkt het filter niet en is de weergave recht. Naarmate u de loper meer naar onder verplaatst wordt de invloed van het filter groter en worden de lage en hoge tonen minder verzwakt dan de middenfrequenties. In de rechter grafiek is de weergavekarakteristiek voorgesteld met volledig dicht gedraaide volumepotentiometer.



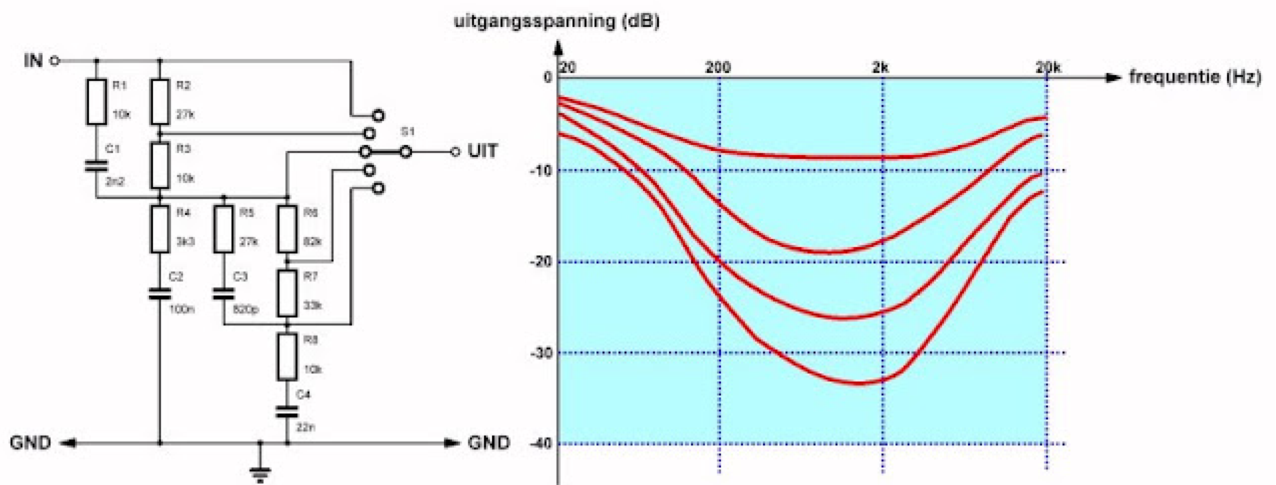
Een eenvoudig AAN/UIT loudness-filter. (© 2023 Jos Verstraten)

Een drie standen loudness-filter
In de onderstaande figuur is een in '*radio electronica*' door K. Millewski beschreven drie standen filter hertekend. Dit filter verzwakt in de tweede en derde stand het signaal met ongeveer 20 en 40 dB bij 1 kHz.



Een loudness-filter met 20 dB en 40 dB verzwakking.
(© 2023 Jos Verstraten)

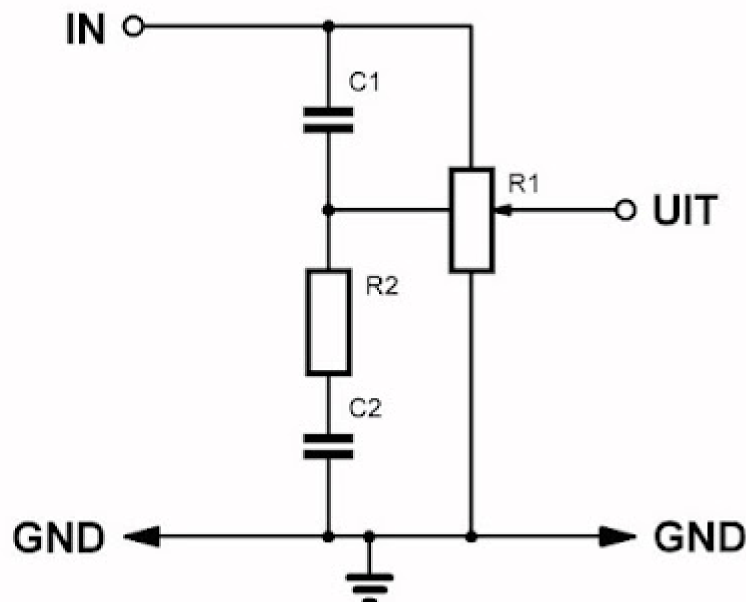
Een vijf standen loudness-filter
Dezelfde auteur heeft zijn drie standen filter uitgebreid tot vijf standen, met als resultaat een fysiologische volumeregeling met 10 dB per stap. De frequentiekarakteristieken van de vier actieve standen zijn in de rechter grafiek samengevat.



Een loudness-filter met 10 dB verzwakking per stap. (© 2023 Jos Verstraten)

Loudness-filters met een tapped potentiometer

Inleiding
De besproken schema's zijn ideale fysiologische volumeregelingen, met het bezwaar dat u een extra bedieningselement op de frontplaat van uw zelfbouw versterker krijgt. Bovendien kunt u het volume dan alleen in stappen regelen en dat is natuurlijk niet erg handig. De meeste mensen willen immers het volume van hun versterker continu regelen met een potentiometer. Vandaar dat men vaak in de praktijk het basisschema van de onderstaande figuur toepast. De potentiometer R1 uit dit schema is de volume potentiometer. Deze heeft nu echter een aftakking, een tap, en op die aftakking is een RC-netwerkje aangesloten.
Als u de loper van de potentiometer tegenover de aftakking zet valt de gelijkenis op met het reeds besproken basisschema. Voor deze stand van de potentiometer ontstaat de ideale fysiologische volumeregeling. Als u de potentiometer echter hoger of lager instelt dan blijft het in feite behelpen. Het is duidelijk dat deze oplossing met een potentiometer met aftakking een compromis is dat echter toch vaak in de praktijk wordt toegepast.



Basisschema van een loudness-filter met tapped potentiometer.
(© 2023 Jos Verstraten)

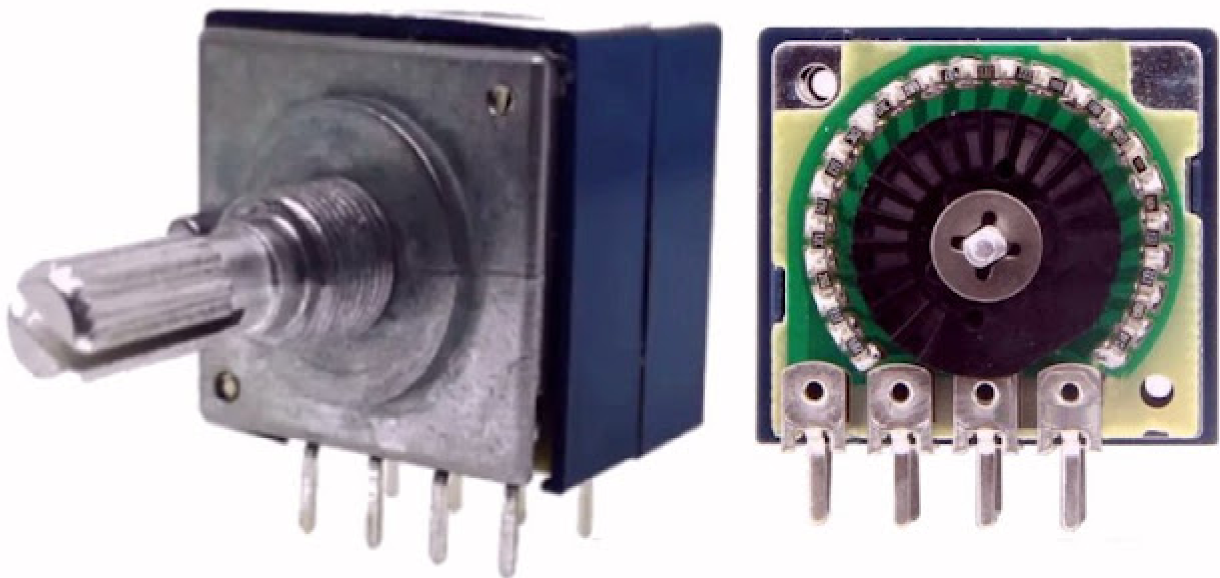
Tapped potentiometers

Misschien hebt u er nog nooit van gehoord, maar ze zijn écht te koop! Google op '*tapped potentiometer*' en u merkt dat potentiometers met een aftakking op de koolbaan een vrij standaard product zijn. In de onderstaande foto ziet u hoe zo'n onderdeel er uitziet. Aan de onderzijde staan de drie normale aansluitingen van een potentiometer, aan de bovenzijde ziet u de soldeerlip van de tap. De tap zit op ongeveer 20 tot 30 % van de totale weerstandswaarde van de koolbaan.



Een tapped potentiometer. (© AliExpress)

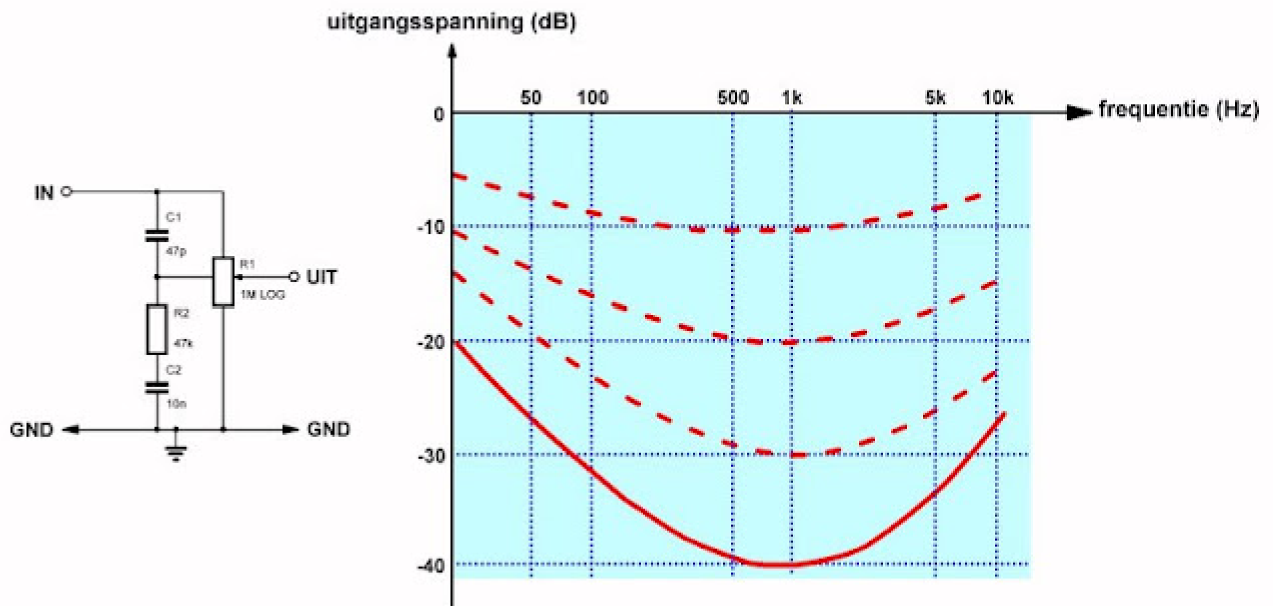
De RH2702
In dit kader verdient één onderdeel uw speciale aandacht. De RH2702 is een tweeëntwintig standen schakelaar die speciaal is ontwikkeld voor de regeling van het volume in audiosystemen met een tapped loudness-filter. Zoals u uit de onderstaande foto kunt afleiden bestaat deze schakelaar uit een weerstandsdeler samengesteld uit 21 SMD-weerstandjes. De tap is verbonden met het knooppunt tussen twee van deze weerstandjes.



De RH2702 is speciaal ontworpen voor gebruik in een tapped loudness-filter. (© AliExpress)

Een praktisch tapped loudness-filter
De reeds genoemde K. Millewski heeft een loudness-filter ontworpen rond een logaritmische potentiometer van 1 MΩ. Als de loper van de potentiometer op de tap staat voldoet de frequentiekarakteristiek aan de volle lijn in de grafiek. Als u de loper naar boven beweegt

voldoet de frequentieweergave aan de gestippelde lijnen. Als u de loper naar een lagere positie verplaatst verandert er niets aan de weergavekarakteristiek. Deze blijft gelijk aan de volle lijn, maar dan uiteraard op een lagere waarde.|



Een door K. Millewski ontworpen tapped loudness-filter. (© 2023 Jos Verstraten)

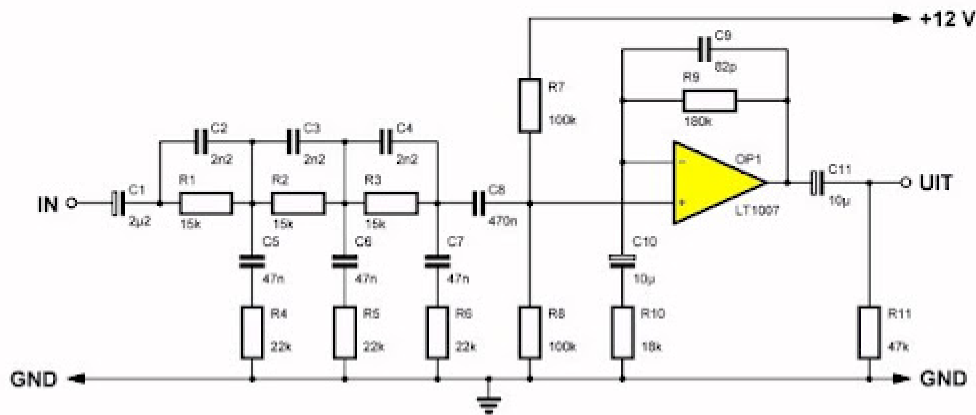
Complexere loudness-filter schakelingen

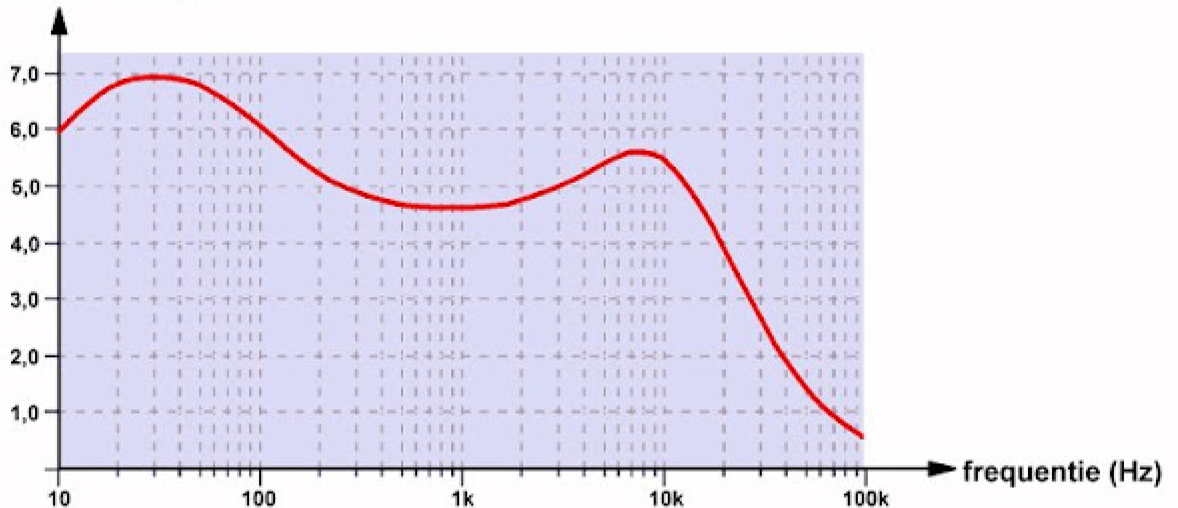
Inleiding
Naast de twee beschreven methoden, met een schakelaar en met een tapped potentiometer, kunt u in de elektronica literatuur nog andere schakelingen vinden die op ingenieuze manier de isofonenbundel van Robinson en Dadson zo goed mogelijk proberen te compenseren. Tot slot van dit artikel gaan wij een paar van deze alternatieven bespreken.

Het actieve filter van A. Collinson
In de onderstaande figuur is een vrij ingewikkelde schakeling voorgesteld die volgens de ontwerper A. Collinson de volgende compensatie geeft ten opzichte van 1 kHz:

- 20 Hz: versterking van 13 dB
- 20 kHz: versterking van 9 dB

Let er dus op dat dit een schakeling is die niet verzwakt, maar versterkt met een aan Robinson en Dadson aangepaste frequentiekarakteristiek.
De condensator C1 is de noodzakelijke scheidingscondensator die een eventueel op de ingang aanwezige gelijkspanning blokkeert. Nadien volgt het filter, samengesteld uit drie identieke segmenten. R1 parallel aan C2 en C5 is serie met R4 vormen de kringen waarvan de wisselstroomweerstand afhankelijk is van de frequentie.
C2 heeft een lage weerstand voor hoge frequenties en C5 heeft een hoge weerstand voor lage frequenties. Daar een geschikte keuze van de componentenwaarden wordt de juiste frequentiecompensatie verkregen. De versterker rond OP1 is een standaard niet-inverterende versterkertrap. Deze wordt door middel van de spanningsdeler R7/R8 ingesteld op de helft van de voedingsspanning. De weerstanden R9 en R10 bepalen de spanningsversterking van de trap. De condensator C9 zorgt voor een beperking van de bandbreedte boven 20 kHz.
Onder het schema staat de weergavekarakteristiek, voor de afwisseling nu eens niet voorgesteld op de traditionele dB-as, maar op een spanning-as.

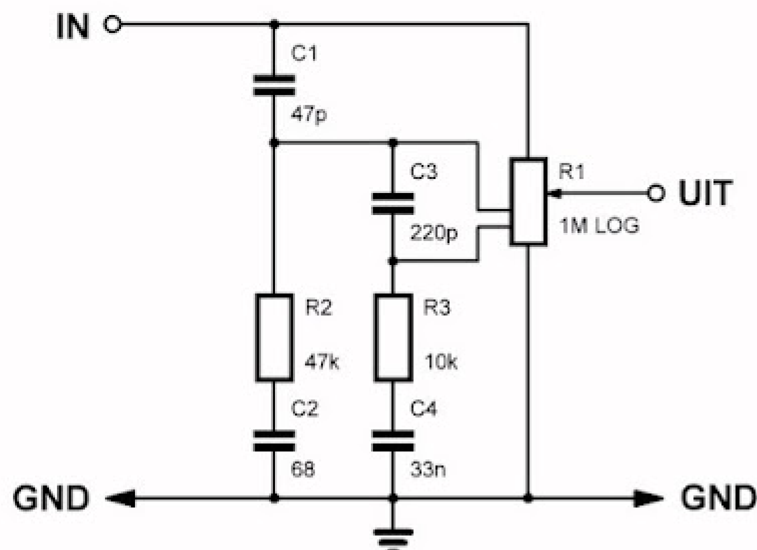




Het loudness-filter van A. Collinson. (© 2023 Jos Verstraten)

Loudness-filter met een two-tapped potentiometer

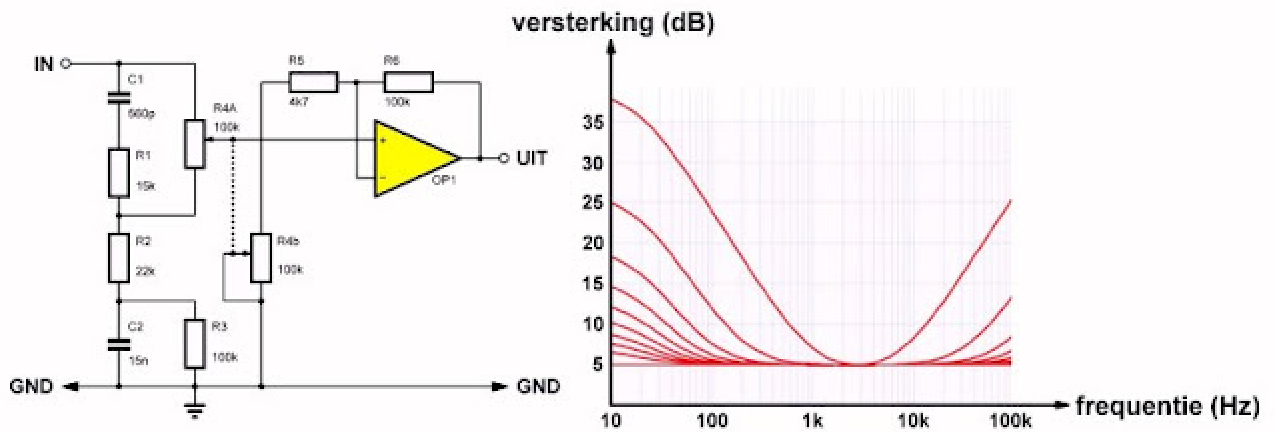
Hoewel wij ze niet kunnen vinden, beweert de reeds eerder aangehaalde ontwerper K. Millewski dat er logaritmische potentiometers worden gefabriceerd met twee tap's. Rond zo'n onderdeel heeft Millewski een loudness-filter ontworpen dat volgens hem de Robinson en Dadson curve zo goed als ideaal compenseert. Het schema is getekend in de onderstaande figuur. De twee tap's zitten op 10 % en 20 % van de totale waarde, aan de kant van de massa-aansluiting.



Een loudness-filter van K. Millewski. (© 2023 Jos Verstraten)

Een actief loudness-filter met een stereo potentiometer

Tot slot een schema van een frequentie-gecompenseerde versterker die gebruik maakt van een tweetraps regeling. In beide trappen wordt één deel van een stereo potentiometer gebruikt voor het regelen van de verzwakking of de versterking. Als de lopers van de potentiometers in de bovenste stand staan is het compensatie-netwerk niet actief en werkt OP1 als niet-inverterende versterker met een spanningsversterking van ongeveer 5 dB. Naarmate u de lopers meer naar onder verplaatst zal de invloed van het frequentieselectief netwerk toenemen. In de onderste stand wordt bij de lage frequenties een versterking van meer dan 30 dB bereikt en bij de hoge frequenties ongeveer 20 dB.



Een actief loudness-filter met stereo potentiometer. (© 2023 Jos Verstraten)

Let op de uit- en ingangsweerstanden!

Bij het toepassen van de schakelingen uit dit artikel in een bestaande audioversterker moet u goed rekening houden met de uit- en ingangsweerstanden van de blokken waartussen u het loudness-filter opneemt. U moet de ingang van de schakeling aansluiten op een blok dat een zeer lage uitgangsweerstand heeft en de uitgang op een blok dat een zeer hoge ingangsweerstand heeft.
Als u daar niet zeker van bent is het verstandig twee extra schakelingetjes toe te voegen die zorgen voor deze condities. In het onderstaand schema wordt het loudness-filter opgenomen tussen twee emittervolgers, die zorgen voor de noodzakelijke lage uit- en hoge ingangsweerstand.

